

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-295238

(43)Date of publication of application : 15.10.2003

(51)Int.Cl. G02F 1/35
 H01S 3/30
 H04B 10/16
 H04B 10/17
 H04J 14/00
 H04J 14/02

(21)Application number : 2003-072205

(71)Applicant : FTTEL USA CORP

(22)Date of filing : 17.03.2003

(72)Inventor : HEADLEY CLIFFORD
 MERMELSTEIN MARC

(30)Priority

Priority number : 2002 098200

Priority date : 15.03.2002

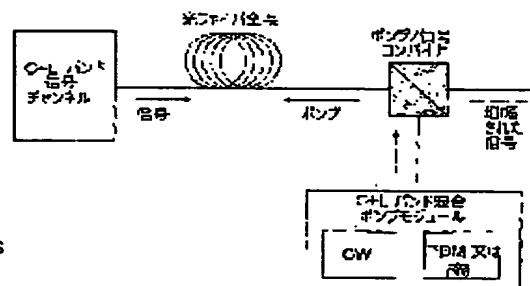
Priority country : US

(54) WIDE BAND RAMAN AMPLIFIER

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a distributed Raman amplifier which has a flat gain over a wide wavelength range.

SOLUTION: The specification describes a distributed Raman amplifier with multiple pump sources for wide band amplification of wavelength division multiplexed (WDM) signals. It was recognized that using multiple pump sources introduces non-linear effects, such as four wave mixing (FWM). These effects are reduced by multiplexing the pump wavelengths in the multiple pump source. It was also recognized that not all of the pump wavelengths over the wavelength spectrum of the pumps contributes to FWM. Thus fewer than all of the pump wavelengths require multiplexing to eliminate FWM in the multiple wavelength pump source. Various approaches are described to ensure that the pump wavelengths do not interact in FWM in the transmission span. The selected individual pump wavelengths may be either time division multiplexed, or frequency modulated.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

16.04.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

BEST AVAILABLE COPY

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2003-295238
(P2003-295238A)

(43) 公開日 平成15年10月15日 (2003.10.15)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード* (参考)
G 0 2 F 1/35	5 0 1	G 0 2 F 1/35	5 0 1 2 K 0 0 2
H 0 1 S 3/30		H 0 1 S 3/30	Z 5 F 0 7 2
H 0 4 B 10/16		H 0 4 B 9/00	J 5 K 1 0 2
10/17			E
H 0 4 J 14/00			

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 10 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2003-72205(P2003-72205)
(22) 出願日 平成15年3月17日 (2003.3.17)
(31) 優先権主張番号 10/098200
(32) 優先日 平成14年3月15日 (2002.3.15)
(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 302003314
ファイテル ユーエスエー コーポレー
ション
F i t e l U S A C o r p .
アメリカ合衆国 30071 ジョージア, ノ
アクロス, ノースイースト エクスプレス
ウェイ 2000
(74) 代理人 100064447
弁理士 岡部 正夫 (外10名)

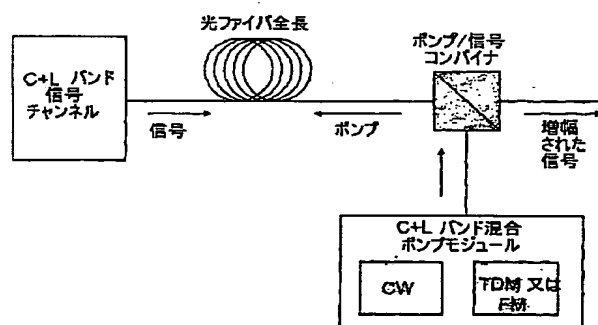
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 広帯域ラマン増幅器

(57) 【要約】

【課題】 波長の広範な帯域にわたって平坦なゲインを備えた分散ラマン増幅器を提供すること。

【解決手段】 本明細書は、波長分割多重化 (WDM) された信号の広帯域増幅のための、複数のポンピング・ソースを備えた分散ラマン増幅器について述べている。複数のポンピング・ソースを使用することは、四波混合 (FWM) などの非線形効果を導入することが認識された。これらの効果は、複数のポンピング・ソースのポンピング波長を多重化することによって低減される。複数のポンプの波長スペクトルにわたる各ポンピング波長の全てがFWMに寄与しているのではないことも認識された。したがって、多重波長ポンピング・ソースにおけるFWMを排除するためには、全てより少ない数のポンピング波長を多重化することが必要となる。ポンピング波長が伝送の全長内のFWMにおいて相互作用しないことを確実にするために、様々な手法が述べられている。選択された個々のポンピング波長は、時間分割多重化されても、周波数変調されてもよい。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ラマン増幅を使用する光学システムであって、

- a. ある長さの光導波路と、
- b. 少なくとも 3 つの波長分割多重化 (WDM) された波長を含む光波信号を前記光導波路に導入するための光波信号手段と、
- c. グラス・ファイバのコアに光波・ポンピング・エネルギーを導入し、それにより光波信号のラマン増幅を起こすように前記光波ポンピング・エネルギーが前記光波信号と相互作用し、N 個の個別のポンピング・ソースを含み、N は少なくとも 3 であり、その各々は異なる波長で動作する、光学的ポンピング手段とを備え、N 個の個別のポンピング・ソースのうちの、x が少なくとも 1 である N-x 個を変調するための手段を特徴とする光学システム。

【請求項 2】 前記光導波路が、ある長さの光ファイバを含む請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 3】 前記光波信号が、前記光ファイバ内を 1 つの方向に進行し、前記光波ポンピング・エネルギーが、反対の方向に進行する請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 4】 前記 N-x 個の個別のポンピング・ソースが時間分割多重化される請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 5】 前記 N-x 個の個別のポンピング・ソースが周波数変調される請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 6】 N は少なくとも 3 であり、x は少なくとも 2 である請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 7】 前記光ファイバは Ge がドープされたシリカを含む請求項 2 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 8】 前記 N 個の個別のポンピング・ソースが、1380nm~1520nm の波長範囲で動作する請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 9】 前記 WDM 波長が 1490nm~1610nm の範囲にある請求項 8 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 10】 前記 N 個の個別のポンピング・ソースが、少なくとも 2 つのペア P1 および P2 に分割され、前記ペアは時間分割多重化される請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 11】 前記 N 個の個別のポンピング・ソースが、少なくとも 2 つのペア P1 および P2 に分割され、前記ペアは周波数変調される請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【請求項 12】 前記 N 個の個別のポンピング・ソースの少なくとも 1 個が、前記 N 個の個別のポンピング・ソースの他の 1 個の最大ゲイン・ピークから少なくとも 1.5 ストックス・シフト離れている請求項 1 に記載のファイバ増幅器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は一般にラマン増幅器に関し、さらに詳細には、波長の広い帯域にわたって平坦なゲインを備えた分散ラマン増幅器に関する。

【0002】

【従来の技術】 光伝送システムは、光ファイバ伝送回線、典型的には長距離伝送回線の情報の取り扱い量を増加させるために、波長分割多重 (WDM) を採用している。初期の WDM システムは、しばしば C バンドと呼ばれる 1550 ナノメートル (nm) に中心を持つ、例えば、1530~1565 nm の比較的狭い波長帯域を使用して動作していた。これは、シリカを主成分とした標準的な光ファイバが、最も適した低い吸収を有する波長領域である。

【0003】 ほとんどの WDM システムにおいて、システムが収容できるチャンネル数とチャンネル分離とは引き替えとなっていた。どちらの目的にとっても、広い動作周波数帯域、すなわち、広い範囲の動作波長が好ましいものである。

【0004】 最近、C バンドの伝送帯域のはるか上方に有効動作波長範囲を広げたシステムが設計された。波長に関しては、L バンドと呼ばれる新しい帯域が様々に規定されているが、本説明の目的のためには、これは 1570~1610 nm である。これらの付加的な波長の使用は、WDM システムの能力を実質的に拡大している。有効動作波長の枠 (window) を 1610 nm 以上、例えば、1620 nm にさらに拡大するために、現在も努力が重ねられている。これらの努力の成否は、構成要素、例えば、この広い波長範囲にわたって有効な動作を提供する増幅器を見出すことにかかっている。

【0005】 WDM システムにおいては、WDM 波長帯域全体にわたって均一なゲインを有することが重要である。この目的は、動作波長範囲がさらに長い波長に拡大されるに従って、達成することがさらに困難になる。最近、ラマン散乱を使用する新しいタイプの光ファイバ増幅器が開発されている。これらの中で最も優れたものは、進行波増幅器として通常の伝送の全長 (span) にわたって動作する分布型増幅器である。ラマン散乱は、媒体に入射した光が、入射光より低い周波数の光に変換される過程である。ポンピング・フォトンが分子を仮想準位 (非共鳴状態) にまで励起する。分子の状態は、それより低いエネルギー準位に素早く減衰し、この過程で信号フォトン放射する。ポンピング・フォトンが仮想準位に励起されているため、ラマン・ゲインは、いかなる波長のポンピング・ソースに対しても発生する。ポンピング・フォトンと信号フォトンとの間のエネルギーの差は、ホスト材料の各分子振動によって散失される。これらの振動準位は、ラマン・ゲイン曲線の周波数シフトおよび形状を決定する。ポンピング・フォトンと信号フォ

トンとの間の周波数（または、波長）の差は、ストークス・シフトと呼ばれる。Geをドープしたシリカ・ファイバにおいて、ゲインの最大値が得られるストークス・シフトは、13テラヘルツ（THz）までである。シリカの非晶質性によって、ラマン・ゲイン曲線は、光ファイバにおいて、かなり広いものになる。

【0006】ラマン散乱はいかなる波長においても発生し得るため、この散乱は、信号を増幅するためにいくつかの異なった波長のラマン・ポンピングを使用することによって、複数の信号波長を含む通信システムに利益をもたらすために利用することができる。特定の波長で見られるゲインは、ラマン散乱によるポンプ間のエネルギーの転送を考慮した全てのポンプによって提供されるゲインを重ね合わせたものである。各ラマン・ポンピング波長において供給されるパワーに適切に重み付けすることによって、異なった信号波長によって見られるゲイン間に小さな差（この差はゲイン・リブルまたはゲイン・フラットネスと呼ばれる）がある信号ゲイン対波長プロファイルを得ることが可能になる。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】ポンプの多重性は多くの異なった実験に使用され、成功を収めてきた。しかし、この手法には1つの長年続く問題がある。それは、時々、四波混合（FWM）と呼ばれる有害な非線形効果が発生することである。通信システムにおいて、信号帯域内でFWMが発生すると、伝送エラーをもたらすことがある。多重ポンピング波長ラマン増幅方式においては、ポンプ数が増加するに従ってFWMの可能性は増加する。

【0008】四波混合の有害な効果が理解されている。最近、これらの効果の低減に向けた1つの手法が提案された（EP 1 148 666 A2）。この手法において、各ポンピング波長は、一緒に時間分割多重（TDM）されているか、または、ポンピング・ソースの周波数が変調（FM）されている。様々なポンピング波長がファイバに沿った短い距離のみにわたって重なっているため、ポンピング波長間のFWMは排除されるか、または、大幅に低減されなければならない。

【0009】この手法がFWMを排除する一方、このシステムにおける定格ポンピング・パワーの要件は比較的高度である。さらに、TDMを行なうために、一部が比較的大きなパワーで動作する比較的大きな数のポンピング波長が、システムのコストを大幅に上昇させている。これらの要件のいずれをも軽減することは、有害なFWM効果を制御するために多重化ポンピング波長を使用することの魅力大幅に強めるものである。加えて、C+Lバンドにわたって均一かつ平坦なゲインを作成することに効果的であるラマン増幅器は、DWDMシステムの設計における重要な技術的進歩を代表するものである。

【0010】

【課題を解決するための手段】本発明は、FWM効果が全てのポンピング波長にわたっては均一でないことの理解に部分的に基づいている。発明者は、分布型ラマン増幅器のCおよびLバンドに平坦なラマン・ゲインを提供するために必要なポンプの波長およびパワーを解析した。この解析から、FWMの特に深刻化している場所には、特定のポンピング波長が特定された。以下に述べる例のポンプ・スペクトルにおける最も短い波長であるいくつかの波長は、FWMをほとんど、または、全くもたらない。また、長い波長において必要とされるパワーが、短い波長におけるものより大幅に小さいことも観察された。これは、短い波長が伝送の全長において長い波長をポンピングするためである。この理解に従えば、FWMに寄与しているポンピング波長に対してのみTDMまたはFMを使用することによって、有害なFWMの排除を実現することができる。また、このTDMまたはFM方式は伝送の全長における短い波長による長い波長のポンピングを利用するため、この方法によって必要とされるパワーの大きさは低減される。長い波長は、常に低いラウンチ・パワー（launch power）を有する。結果は以下を含む。

1）より少ないTDMポンプによって、各ポンプに対するスイッチング要件、並びに、必要なピーク・パワーが低減される。

2）FMソースに必要な周波数範囲が削減される。

3）変調するためのポンプが少なくなり、電子回路の総コストが下がる。

4）ポンプ多重化のために必要な周波数範囲を狭くすることによって、掃引波長ソース（swept wavelength source）に対する要求が削減され、この選択肢をより魅力的かつ実行しやすいものになっている。

【0011】

【発明の実施の形態】図1を参照すると、示す配列は、最も典型的には光ファイバである伝送の全長11を備えた分布型ラマン光ファイバ増幅器の構造を表す。伝送の全長11は、典型的には1km以上の実質的な長さのファイバを表す。当業者には、本説明における図が一定の縮尺では描かれていず、各要素が模式的に示されていることが明らかである。説明の詳細を例示する目的のために、本発明の好ましい実施例、すなわち、増幅器媒体が通常の伝送の全長である分布型増幅器を示す。本発明の原理は離散増幅器にも適用され、この場合、増幅媒体は専用の長さの光ファイバであるか、または、他の適切な進行波媒体である。11で示されるファイバの長さは、好ましくは、信号の増幅を生み出す光学的相互作用を考慮した少なくとも500mの長さである。増幅器は、12において模式的に示すカブラを介してファイバのコアに結合されるポンピング・ソース13によって図中に示すように、典型的に終端ポンピング（end pumped）されており、かつ、逆ポンピング（counterpumped）されてい

る。典型的なポンピング波長は $14 \times 10^3 \text{ nm}$ であるが、他の波長でもよい。入力信号は14で示し、増幅された信号出力は16で示す。

【0012】図2を参照すると、光ファイバの終端が示されている。この図は、ファイバに沿ったいかなる位置においても取られる断面の代表的なものである。ファイバは、コア21および被覆22を含む。ファイバのコアは、典型的に Ge がドープされたシリカである。代わりに、これは、リンもしくは他の屈折率修正不純物、または、これらの組み合わせをドープすることもできる。被覆層は、好ましくは、高純度シリカ材、すなわち、少なくとも純度85%の SiO_2 である。いくつかの好ましい構造において、これは、純粋なシリカまたはフッ素がドープされたシリカであってもよい。ファイバは、典型的にはポリマ・コーティングである保護コーティング23も有する。

【0013】図2に示す構造の寸法は、実質的に変化してもよい。被覆層の直径は、典型的には $50 \sim 400 \mu\text{m}$ の範囲にあり、好ましくは $70 \sim 300 \mu\text{m}$ である。コアの直径は、典型的に $2 \sim 12 \mu\text{m}$ である。

【0014】光ファイバ・ラマン増幅器は、シリカを主成分とする光ファイバ内に散乱した光が入射光の波長より短い波長を有するという原理で動作する。これは図3に模式的に示されており、ここで、ポンピング・フォトン ν_p は、分子を仮想準位（非共鳴状態）にまで励起する。分子は、低いエネルギー準位に減衰し、この過程中に信号フォトン ν_s を放射する。注意すべき重要な点は、ポンピング・フォトンが仮想準位に励起されるために、ラマン・ゲインが、いかなる波長においてもポンピング・ソースに対して発生することである。ポンピング・フォトンと信号フォトンの間のエネルギーの差は、ホスト材料の分子振動によって散失される。これらの振動準位は、ラマン・ゲイン曲線の周波数シフトおよび形状を決定する。ポンピング・フォトンと信号フォトンとの間の周波数（または、波長）の差は、ストークス・シフトと呼ばれる。 Ge をドープしたシリカ・ファイバにおいて、ゲインの最大値が得られるストークス・シフトは、 13 THz までである。シリカの非晶質性によって、ラマン・ゲイン曲線は、光ファイバにおいてかなり広いものとなる。 Ge がドープされた光ファイバについての正規化されたラマン・ゲイン・スペクトルを、ポンプからの周波数シフトに関して図4に示す。

【0015】複数の信号波長を含む電気通信システムにおいては、信号を増幅するためにいくつかの異なる波長のラマン・ポンプを使用することができる。なぜなら、ラマン散乱がいかなる波長においても発生し得るからである。特定の波長で見られるゲインは、ラマン散乱によるポンプ間のエネルギーの転送を考慮した全てのポンプによって提供されるゲインを重ね合わせたものである。各ラマン・ポンピング波長において供給されるパワ

ーに適切に重み付けすることによって、異なる信号波長によって見られるゲイン間に小さな差がある信号ゲイン対波長のプロファイルを得ることが可能になる。この差はゲイン・リブルまたはゲイン・フラットネスと呼ばれ、 $(G_{\text{max}} - G_{\text{min}})$ としてdBで表すことができる。

【0016】平坦なゲインを発生するために設計された多重ポンプ・システムの例を図5に示す。長い波長において必要とされるパワーが、短い波長におけるものより大幅に小さいことに注意すべきである。WDMラマン増幅器におけるこの複数のポンプの配列の使用は、図6に示す出力WDM信号を発生し、同図では、比較的平坦なゲインがCおよびLバンドにわたって得られている。

【0017】前述したように、複数のポンプの使用は、四波混合（FWM）の問題を導入する。四波混合は、1つまたは複数のフォトンが組み合わされ、別の周波数のフォトンを生成する時に発生する。新しい周波数は、総エネルギー量および運動量（位相マッチング）が保存されるように決定される。これの1つの可能性を図7に模式的に示す。本説明の流れにおいて、3つの波長 ν_{p1} 、 ν_{p2} 、および ν_{p3} は、2つ以上の個々のポンピング波長に対応している。FWMが、ここに掲げる図においては3つのポンピング波長である3つの波長間の非線形相互作用からもたらされることに注目することが重要である。FWMは、2つのポンピング波長のみと、媒体中を進行する他のソースからの第3の波長とで発生することも可能である。

【0018】電気通信システムにおいて、信号帯域におけるFWMからもたらされる疑似波長成分は伝送エラーを招くこともある。位相マッチング条件が自動的に満たされるラマン散乱とは異なり、FWMの効率は、周波数および屈折率の適切な選択に依存している。位相のミスマッチに対しては3つの寄与がある。すなわち、材料の分散、導波路の分散、および、ファイバの非線形性である。ファイバのゼロ分散波長（したがって、導波路の分散）の位置を操作することによって、非常に効率的なFWMを発生させることができる。実際には、これは、1つのポンピング波長をファイバの分散ゼロ付近に有すること、または、分散ゼロのそれぞれの側の波長を備えた2つのポンプを有することのいずれかになる。したがって、多重ポンピング波長ラマン増幅法におけるポンプ数が増加するに従い、FWMの可能性も増加することが明らかになる。

【0019】FWM効果の低減に向けた効果的な手法は、複数のポンピング波長を時間分割多重化（TDM）することである。様々なポンピング波長がファイバに沿った小さな距離のみで重なり合うため、ポンピング波長間の相互作用から生じるFWMおよび他の有害な非線形効果は排除されるか、または、大幅に低減される。TDM多重ポンピング・ソースを図8に模式的に示す。それ

ぞれ1480nm、1494nm、および、1508nmで動作するレーザ・ダイオード・ポンピング・ソース71、72、および、73は、一緒に同期され、74、75、および、76で示す分離されたタイム・スロットに多重化される。ポンピング・ソース71および72は、WDMコンバイナ81において組み合わせられ、ポンピング・ソース73は、WDMコンバイナ82において71および72に加えられる。図8に示す手法は、FWMおよび他の有害な非線形効果の制御に役立つ一方、これにはいくつかの問題がある。

- 1) 同じゲイン平坦度を維持するために、最初の大量のピーク・ポンピング・パワーが必要である。これは、他の有害な線形効果を招くことがある。
- 2) 必要なTDMポンプの数が増加するに従い、スイッチング速度の要件も増加する。これは、必要なピーク・パワーも増大させる。
- 3) FMソースと同様。信号波長の範囲がさらに広がると、ソースが変調される速度と必要なパワーの双方が上昇する。
- 4) ダイオードを変調することは、それらを一定の出力で動作させるよりコストがかかる。TDM方式によって、これは、ポンプに関連するコストが波長の数とともに増加することを意味する。
- 5) FM方式にとって、必要とされる周波数範囲が広いことは、そのようなソースを開発するための可能性に対する厳しい制約となっている。

【0020】本発明によってこれらの条件を緩和することは、2つの重要な発見に従うものである。まず、全てのポンプが有害なFWMに寄与している訳ではないこと。図9に示す1つの典型的な例では、FWMのメカニズムに関与しているのは、3つの最長波長のみである。この図は、1525~1550nmの波長範囲における5つのWDMチャンネルについて、後方散乱エネルギー対波長(nm)の関係を示す。ここには2本の曲線があり、実線の曲線は信号のない後方散乱を表し、点線の曲線は信号の載せられた後方散乱を表す。ポンピング波長は、1445nm、1466nm、1480nm、1494nm、および、1508nmである。この図はCバンドの一部のみを含むが、C+Lバンドの他の部分は定性的に同様の効果を示す。解析は、約1527nmにおける後方散乱のピークが、ポンピング波長1508nm、1494nm、および、1480nmの間のFWMの結果であることを示す。図7を参照すると、これらは、それぞれ ν_{p1} 、 ν_{p2} 、および、 ν_{p3} に対応する。1527nmにおけるピークは、 ν_{FWM} に対応する。約1537nmにおけるピークは、 ν_{p1} が1494nm、 ν_{p2} が1480nm、および、 ν_{p3} が1445nmであるFWMの結果である。約1540nmにおけるピークは、 ν_{p1} が1508nm、 ν_{p2} が1494nm、および、 ν_{p3} が1466nmであるFWM

の結果である。図7から、図9のFWMピークを発生させるためには、全ての3つのポンピング波長が必要であることが理解される。長い波長が3つのピーク全てについてのFWMの主な構成要素であるという認識が、本発明の1つの態様を導く。長い波長、すなわち、1480nm、1494nm、および、1508nmのみを多重化することによって、FWMに必要な全ての波長が同時に存在する時がないことが確実となる。したがって、TDM多重ポンピング・ソースの長所を得るためには、全ての多重ポンピング・ソースをTDMすることは必要ではない。適切に選択すれば、全てより少ないポンプを多重化すればよい。残りのポンプは、持続波(CW)で動作される。これらの原理に基づくシステムを図10に示す。これは、上記に列挙した要因に関して大幅な進歩をもたらす。全てより少ないポンピング・ソースを多重化することが必要であることが一度認識されれば、それらを選択することは単純明解である。図9に示唆される測定は、よく知られている原理に従っており、実験的に確認できる。

【0021】同様の目的は、TDMの代替物、すなわち、周波数変調されたポンピング・ソースを使用することによっても達成できる。単一ソース・ダイオードで多重ポンピング波長を掃引することによって、1回に1つの波長のみが放射され、したがって、FWMに対する可能性を排除する。この手法は図11に示され、ここで、掃引周波数ソース91は、図8の複数のダイオード71~73の代わりに使用されている。この手法は、いくつかの点で実施がさらに単純であるが、広帯域単一ソースは、図8のシステムのための構成要素ほどには十分に開発されていない。しかし、これらの構成要素が登場すれば、本発明のシステムは、効果的に、または、FM手法についてはさらに効果的にさえ実施することができる。掃引波長ソースに必要な波長範囲が本発明の原理を使用して削減されることを指摘することは重要である。例えば、図10(FM)および図11の掃引ダイオードが1480~1508nmの波長範囲にわたって動作できる一方、1420~1480nmの範囲において動作する残りのポンプは、CWで動作する個々のダイオードである。

【0022】信号チャンネルが変調されたポンプを通過するため、複数ポンプ多重化技術は、逆伝播構成において効果的である。もし、削減された相互作用の長さを補償するために、ポンプのパワーが増大されたなら、光路平均されたラマン・ゲインは一定となる。全ての異なるポンピング波長を通じてTDMまたはFMソースが循環する速度も、信号パワーのゲイン依存変調が生じないように、十分に速くなければならない。ポンプから信号への雑音の転送に関する過去の研究は、全てのポンピング波長についての全体的な反復速度が50kHzを上回るべきであることを示唆している。したがって、各波長は

約 n 倍速く変調され、ここで n は波長の数である。変調速度および必要なピーク・パワーは関連していることに注意すべきである。変調速度が速くなるほど、特定の波長において必要なピーク・パワーが大きくなる。

【0023】これらの解析を行なううえで、長い波長で必要とされるポンプ・パワーは、短い波長におけるものより大幅に小さいことも認識された。これは、ラマン・ポンプの波長が短くなるほど、伝送の全長における波長は長くなるためである。したがって、パワーの点から、これは、長いポンピング波長におけるTDMまたはFMを使用することのみによって有害なFWMの排除を許容可能とする。多重化されたソース全体を完全に均等化するためには、個々のポンピング波長に対するレーザ・ダイオード・ソースが、不均等なパワーを供給するように同調されることが実際には必要となる。これは、長い波長ソースに対するパワー要件を低減し、TDMポンピング・ソースに含まれるポンプ・パワー全体も低減する。ポンプ・パワー全体を低減することは、当技術分野においてよく知られているシステムのいくつかの重要な長所を有することが可能となる。

【0024】個々のポンプ間でのラマン・エネルギー交換の恩恵を得るためには、相互作用の長さが実質的なもの、すなわち、1 km以上であることを必要とする。この長さは、分布型モードで動作する伝送の全長（典型的には1 kmを越える、すなわち、3~100 km）を表してもよく、または、離散増幅器デバイスに使用される光ファイバの長さであってもよい。

【0025】要約すれば、多重化ポンピング・ソースの数を削減することは、以下の長所を有する。

- 1) 本発明が伝送の全長において短い波長による長い波長のポンピングを利用しているため、本発明の選択的ポンピング・ソース多重化によって必要とされるパワーの大きさは削減される。長い波長は、既に低いラウンチ・パワーを有している。
- 2) 多重化の量を削減することによって、各ポンプに必要とされるスイッチング速度および必要なピーク・パワーが低減される。
- 3) FMソースに必要とされる周波数範囲が低減される。
- 4) 変調するためのポンプ数が少なくなったため、電子回路の総コストが低下する。
- 5) 周波数範囲を狭くすることによって、掃引波長ソースの開発に向けた手法の数が増加する。

【0026】従来技術の手法では、多重ポンプ・システムにおける全てのポンプが多重化されており、個々のポンプの間ではエネルギーのラマン交換はない。上記に示すように、これらの相互作用は、長い波長、すなわち、短い波長によってラマン・ポンピングされるもののために必要なポンプ・パワーの低減に役立てることができ。今述べた本手法の改変は、多重TDMまたはFM変

調のパターンを使用することである。基本的に、この手法は上記に述べた認識に基づくが、多重化されたポンプ信号に対する異なった選択方法を使用している。これは、利益をもたらし、さらに、FWM効果を低減または排除するために、個々のポンピング・ソース間のラマン相互作用をデバイス設計者が使用することを可能にする。これを、図12および13に模式的に示す。この例示的システムにおいては、4つのポンピング波長が使用されている。四波混合の各成分は、 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ および $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4$ の組み合わせによって発生される。もし λ_1 と λ_3 におけるポンプの変調が重なり合い、かつ、 λ_2 と λ_4 におけるポンプの変調が重なり合っていれば、全ての有害なFWMは排除できる。この変調方式を図13に示す。加えて、伝送の全長において、 λ_1 におけるポンプはそれでも λ_3 におけるポンプを増幅でき、 λ_2 におけるポンプは λ_3 におけるポンプをポンピングできる。同じ手法は、2つのFMソースに対しても使用でき、ここでは、1つのソースが λ_1 から λ_2 まで掃引する一方、別のソースが λ_3 から λ_4 まで掃引する。いずれの場合においても、伝送ファイバは、時間変化ポンピング・ソースを増幅するために有利に使用される。

【0027】TDMまたはFMポンピング・ソースのための増幅器として、伝送の全長を使用するという概念は、複数次のポンプを使用することに拡張できる。この手法の長所は、最近、米国特許第6,163,630号において指摘された。複数次ラマン・ポンピングにおいて、信号光は、ポンピング光の最大ゲイン周波数から1.5ストークス・シフト大きい。第2次ポンピングにおける例として、信号光から1ストークス・シフト離れた第1次ストークス・ポンプをポンピングするために、信号光から2ストークス・シフト離れたポンピング波長が使用される。図14および15に、これを示す。2つの構成を示す。第1の場合の図14では、第1次および第2次の双方のポンプとも、信号光に比較して逆ポンピングされている。第2次ポンプが第1次ポンプに変換されるためには、有限の長さのファイバを必要とする。したがって、第1次ポンプが信号をポンピングする。したがって、これは、ファイバの信号入力端の近くで信号増幅することを可能にする。この手法の第2の実施例において、第2次ポンプは、信号と同じ方向に進行し（共同ポンピング(co-pumped)される）（図15）、第1次ポンプは逆ポンピングされる。第2次ポンプは、ファイバの入力端において第1次ポンプをポンピングし、これは、第1次ポンプが信号をポンピングすることを可能にする。次に、これは、ラマン・ゲインが、ファイバの信号入力端の近くで起きることを可能にする。第1次ラマン・ポンピングにおいて、ポンプは一般的に信号とは逆方向に進行するため、複数次ポンピングは有利である。増幅のほとんどは、伝送の全長の信号出力端の近くで起

こる。ファイバのこの場所では、信号パワーが既に大幅に劣化している。もしファイバ内に見られるラマン・ゲインがファイバの信号入力端の近くで起こることが可能であれば、改善された信号対雑音比（SNR）および雑音指数（NF）が得られる。第2次ポンプのために必要なパワーは、かなり小さい。複次ポンピングされたシステムの一例において、1366/1456nmに対するパワー比は、それぞれ970/10mWであった。1455nmにおけるこのような小さなパワーを使用すると、この手法も、低いパワー要件を利用することによって、CW-TDMまたはCW-FM方式を使用するために理想的に見える。

【0028】本来はFWMを軽減する手段として考えられたが、本発明には、いくつかの付加的な長所がある。さらに広い帯域幅にわたって動作を拡大するために、現行のシステムを更新することを希望する場合、大幅にコストが削減できる。現在のポンプの全てを交換する代わりに、変調できるいくつかの付加的なポンプを追加することのみが必要となる。ポンプ・パターンおよび/またはパワー準位を操作することによっても、いくつかのチャンネルにわたるゲインの平坦性に対するある程度の制御を得ることができる。これは、異なったゲイン・プロファイルの形状を考慮するものである。加えて、FWMまたは超連続体(supercontinuum)の発生などの非線形効果は、ファイバのゼロ分散波長付近におけるポンプの選択的変調を可能とすることによって、軽減または排除することができる。

【0029】前述の実施例は、CおよびLバンドにおいて動作する分布型ラマン増幅器について述べているが、本発明の原理は、他の波長、例えば、Sバンドのラマン増幅に適用することもできる。したがって、本発明に対して考えられている信号波長の範囲は、1490nm～1610nm、および、それ以上である。ポンピング波長の範囲は、典型的に1380nm～1520nmであるが、他の波長も有用であることを見出すことができる。

【0030】本発明を実施するために適するポンピング・ソースは、半導体ダイオード、例えば、Si、GaAlAs、InGaAs、InGaAsPである。半導体ポンプ・レーザは好ましいが、他のポンピング・ソース、例えば、Nd-ガラス、Ti-サファイアを使用することもできる。

【0031】ほとんどの場合、本発明の増幅器は逆ポンピングされることが企図されている。上記の実施例の1つは、逆ポンピングおよび共同ポンピングについて述べ

ており、全てではなくとも、典型的ないくつかの逆ポンピングが使用される。

【0032】上述した通り、本発明は、全てより少ない数の増幅器ポンピング・ソースのTDMまたはFMのいずれかを使用して実施することができる。本説明または冒頭の特許請求の範囲において使用されている用語「変調」は、TDMおよびFMの双方を含むことが意図されている。

【0033】本発明の様々な付加的改変は、当業者に考えられるものである。本技術が進歩された本発明の原理およびその均等物に基本的に依存する本明細書の特定の教示からの全ての逸脱は、説明され、かつ、特許請求されている本発明の範囲内であると適切に考えられる。

【図面の簡単な説明】

【図1】ラマン光ファイバ増幅器の簡略構造図である。

【図2】図1の増幅器に使用される光ファイバの模式図である。

【図3】光ファイバ・ラマン過程の動作の模式図である。

【図4】Geがドーブされたシリカの光ファイバについての正規化されたラマン・ゲイン・スペクトルを示す曲線である。

【図5】140kmの光ファイバのC+Lバンドにおける平坦なゲイン・リップルについてのポンプ・パワー対ポンピング波長をプロットした図である。

【図6】図5のポンプを使用した増幅器ゲイン対ポンピング波長をプロットした図である。

【図7】1つの可能な四波混合(FWM)過程の模式図である。

【図8】時間分割多重化(TDM)ポンピング波長を使用する多重波長ポンプ模式的構造図である。

【図9】四波混合とポンピング波長の関係を示すプロット図である。

【図10】本発明の原理を利用するラマン増幅器の模式図である。

【図11】周波数変調(FM)多重波長ポンプの模式図である。

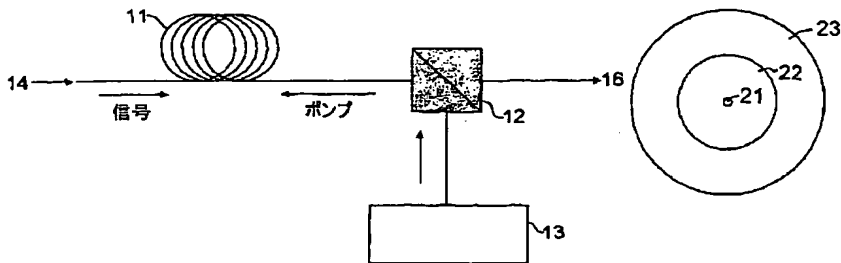
【図12】本発明の代案となる実施例によるペアのポンピング・ソースの例を示す図である。

【図13】図12のポンピング波長に対するTDMのパターンを示す図である。

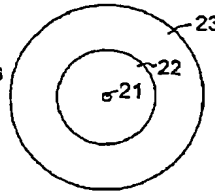
【図14】ポンプの方向についての代案となる配列を示す図である。

【図15】ポンプの方向についての代案となる配列を示す図である。

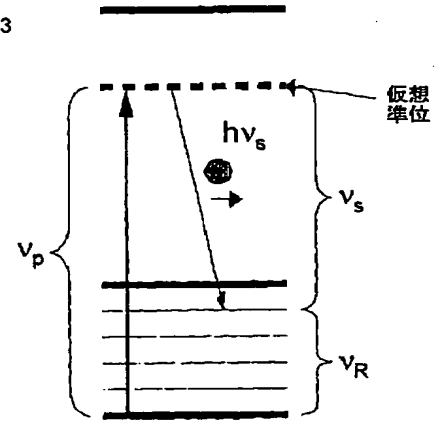
【図1】



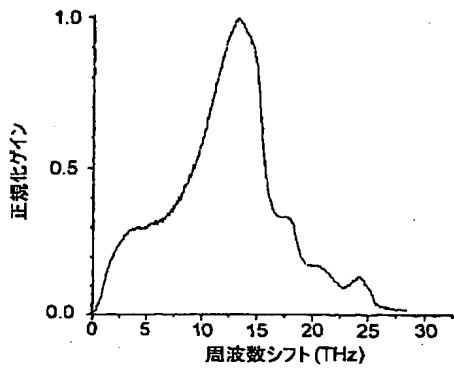
【図2】



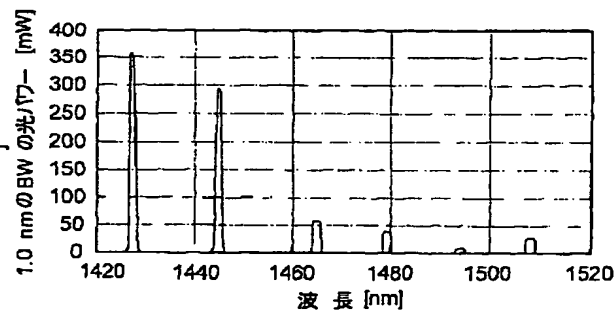
【図3】



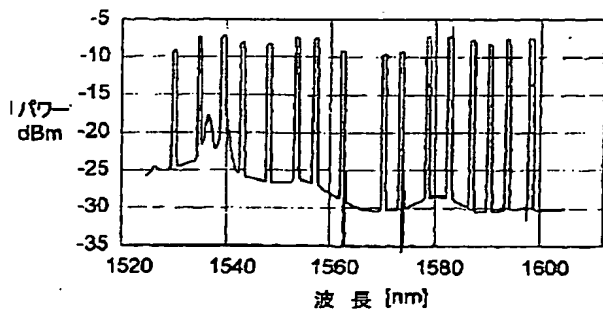
【図4】



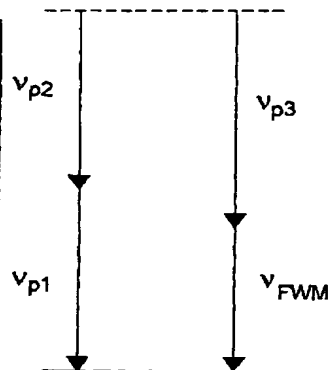
【図5】



【図6】



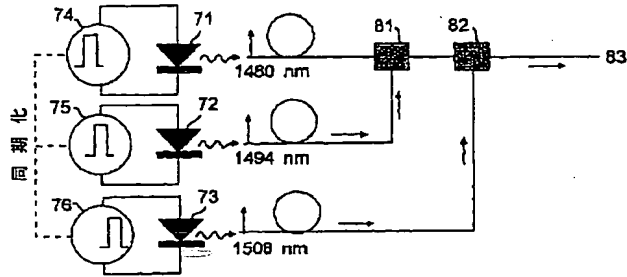
【図7】



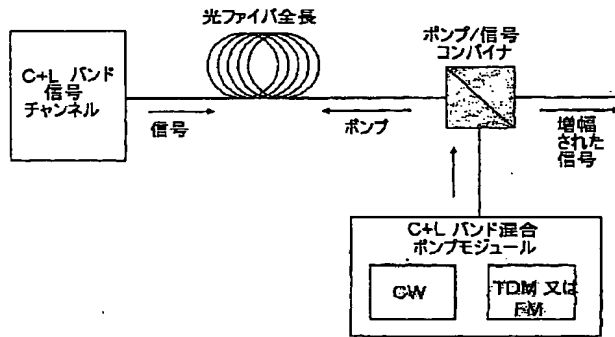
【図14】



【図8】

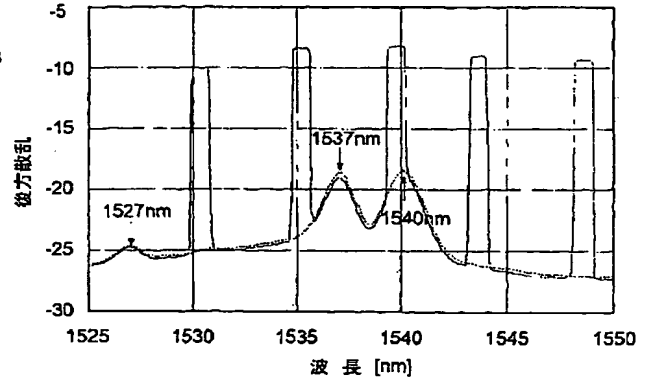


【図10】

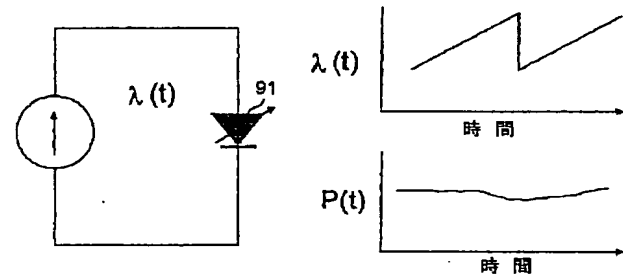


【図12】

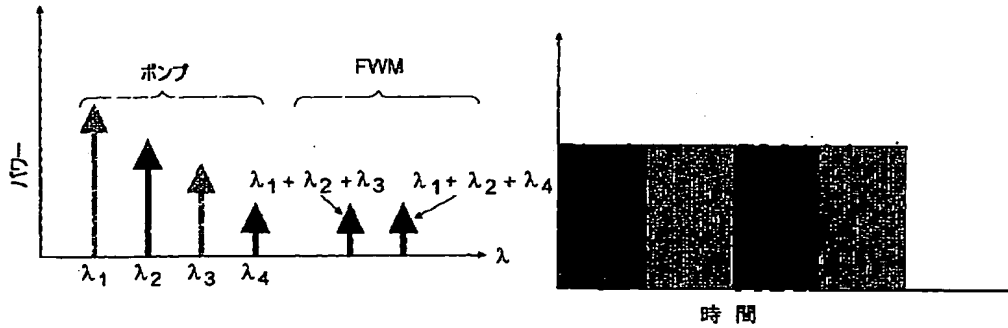
【図9】



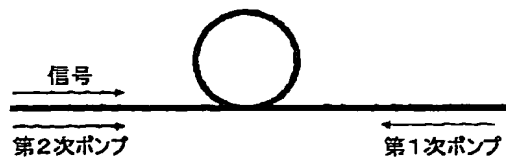
【図11】



【図13】



【図15】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 7	識別記号	F I	タームコード (参考)
H 0 4 J 14/02			
(72) 発明者	クリフォード ヘッドレイ	F ターム (参考)	2K002 AA02 AB30 BA01 CA15 DA10
	アメリカ合衆国 08822 ニュージャージー		EB13 GA10 HA23
	ィ、フレミントン、アバーディーン サー		5F072 AB07 AB13 AK06 HH05 HH07
	クル 17		JJ02 JJ20 KK15 MM03 PP07
(72) 発明者	マーク マーメルステイン		QQ07 RR01 YY17
	アメリカ合衆国 08904 ニュージャージー		5K102 AA01 AA55 AD02 AK05 KA01
	ィ、ハイランド パーク、フデー、サウス		KA07 KA42 MA03 MB05 MC15
	アデレイド アヴェニュー 30		MD01 MH04 MH12 MH22 PB00
			PB18 PH14 PH48 PH49 PH50